文章编号:1000-4939(2024)06-1418-10

不同鞋帮高度篮球鞋对踝关节稳定性及动力学影响的研究

钟茵菲[1],温鑫菲[1],鲁荻[2]

(1. 东华大学体育部,200010 上海;2. 上海立信会计金融学院 体育与健康学院,201202 上海)

摘 要:目的 探讨不同鞋帮高度篮球鞋对运动员在运动中的踝关节稳定性和动力学特性的影响。**方法** 随机择取 18 名男性篮球运动员,采用 200 Hz 的红外动作捕捉系统和 1 000 Hz 的三维测力台对运动员运动过程中踝关节的稳定性及动力学特征数据进行采集,对比分析穿着不同鞋帮高度(低帮、高帮)篮球鞋的篮球运动员在运动时的踝关节角度、踝关节活动幅度、踝关节三维角速度、地面反作用力、踝关节力矩及功率等动力学特征。**结果** 研究发现穿着低帮鞋时的最大背屈、最大跖屈、最大外翻、最大外旋角度均略高于穿着高帮鞋,但差异无统计学意义($P>0.05$);穿着高帮鞋的最大内翻角度高于穿着低帮鞋,差异显著($P<0.05$);穿着高帮鞋的最大跖屈角速度比穿着低帮鞋时降低了约 61.8 °/s,具有显著性差异($P<0.05$);穿着高帮鞋时的向内地面反作用力峰值较穿着低帮鞋时略高 0.44 $N\cdot BW^{-1}$,具有显著性差异($P<0.05$);第一峰值力的最大加载率随鞋帮高度增加而降低($P<0.05$);穿着低帮鞋运动时着地时刻的最大伸踝力矩较穿着高帮鞋时增大 0.44 N·m/kg,具有显著性差异($P<0.05$)。**结论** 在选择篮球鞋时,对于需要高稳定性和保护性的力量型篮球运动员,高帮鞋是更好的选择;而对于追求轻便和灵活性的速度型篮球运动员,低帮鞋更加合适。

关键词:鞋帮高度;篮球运动员;踝关节;稳定性;动力学

中图分类号:G804.6 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.023

Research on the influence of basketball shoes with different upper heights on ankle stability and dynamics

ZHONG Yinfei[1], WEN Xinfei[1], LU Di[2]

(1. Sports Department, Donghua University, 200010 Shanghai, China; 2. School of Physical Education and Health, Shanghai Lixin University of Accounting and Finance, 201202 Shanghai, China)

Abstract: Objective To explore the effects of basketball shoes with different shoe upper heights on ankle stability and dynamic characteristics of athletes during exercise. **Methods** Eighteen male basketball players were randomly selected, and data of the stability and dynamic characteristics of their ankle joints

收稿日期:2024-08-21 **修回日期:**2024-10-17
基金项目:上海市体育决策咨询研究项目(No. TY202023);上海市教育科学研究项目(No. A2024008)
通信作者:鲁荻。E-mail:ludi20160413@163.com
引用格式:钟茵菲,温鑫菲,鲁荻. 不同鞋帮高度篮球鞋对踝关节稳定性及动力学影响的研究[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1418-1427.
ZHONG Yinfei, WEN Xinfei, LU Di. Research on the influence of basketball shoes with different upper heights on ankle stability and dynamics[J]. Chinese journal of applied mechanics,2024,41(6):1418-1427.

during exercise were collected using a 200 Hz infrared motion capture system and a 1 000 Hz three-dimensional force platform. Comparative analysis was made on the dynamic characteristics of ankle joint angle, ankle joint range of motion, ankle joint three-dimensional angular velocity, ground reaction force, ankle joint torque, and power of basketball players wearing basketball shoes with different upper heights (low top, high top) during exercise. **Results** The study found that the maximum dorsiflexion, plantarflexion, eversion, and external rotation angles when wearing low top shoes were slightly higher than those when wearing high top shoes, but the difference was not statistically significant ($P>0.05$). The maximum inward angle when wearing high top shoes was significantly higher than when wearing low top shoes ($P<0.05$). The maximum plantar flexion angular velocity of wearing high top shoes decreased by about 61.8 °/s compared to wearing low top shoes, with a significant difference ($P<0.05$). The peak inward ground reaction force when wearing high top shoes was slightly higher than that when wearing low top shoes by 0.44 N · BW^{-1}, with a significant difference ($P<0.05$). The maximum loading rate of the first peak force decreased with the increasing shoe upper height ($P<0.05$). The maximum ankle extension torque at the moment of landing when wearing low top shoes was 0.44 N · m/kg higher than when wearing high top shoes, with a significant difference ($P<0.05$). **Conclusion** When choosing basketball shoes, high top shoes are a better choice for strength basketball players who require high stability and protection, while for speed basketball players who pursue lightness and flexibility, low top shoes are more suitable.

Key words: shoe collar height; basketball player; ankle joint; stability; dynamics

篮球运动作为一项高强度、高对抗性的体育项目,其运动员在比赛中不仅需要展现出色的身体素质和篮球技巧,更需要在激烈的身体对抗中保护自身免受伤害[1-2]。在篮球比赛中,运动员需频繁进行跳跃、变向、急停急起等高强度动作,这些动作不仅考验着运动员的体能与技术,也对踝关节的稳定性和动力学特征构成了巨大挑战。踝关节作为连接足部与小腿的关键部位,也是人体负重量最大的屈戍关节,在平稳行走时承受的力约等于体质量的 1.25 倍,而在篮球运动中的侧切动作,甚至会承受高达 5.5 倍体质量的力,从而常会引起运动员踝关节损伤[3-4]。因此,如何降低篮球运动员踝关节损伤的风险,成为了体育科研领域关注的热点问题。

篮球鞋作为运动员与运动场地直接接触的媒介,其设计特性对运动员的运动性能和受伤风险有着不可忽视的影响,不仅关系到运动员的运动表现,更直接关系到运动员的健康与安全[5]。其中,篮球鞋的鞋帮高度作为设计中的重要参数,一直备受关注,其不仅是篮球鞋外观的显著特征,更是影响运动员生物力学特征的关键因素[6-7]。傅维杰等[8]通过研究受试者穿着高、低帮篮球鞋对其跳跃动作的踝关节矢状面运动学、动力学以及运动表现的影响,发现穿着高帮鞋虽然没有限制跳跃情况下踝关节的屈伸表现,但会影响踝关节矢状面的部分动力学特征。魏书涛[9]指出穿着高帮足球鞋虽然不会对 45°横跨步侧切时踝关节的峰值内翻角度和关节活动度构成限制,但会影响矢状面的部分运动学特征,导致高帮足球鞋的稳定性在一定程度上较低帮足球鞋更低。周志鹏等[10]通过研究鞋帮高度对侧切动作踝关节生物力学特征的影响,指出穿着高帮球鞋运动在一定程度上可提高踝关节侧向稳定性和降低扭伤风险。由此可见,在运动员进行运动时,不同高度的鞋帮会对踝关节的受力情况、活动范围以及能量传递等产生不同的影响[11-13]。然而,随着现代篮球运动的发展,运动员对鞋子的舒适性和运动性能要求越来越高。因此,选择合适的鞋帮高度,加强对运动员踝关节的保护,对于提升运动员的运动表现,降低运动损伤的风险具有关键意义。

为此,本研究旨在通过系统的实验设计和科学的分析方法,探讨篮球鞋不同鞋帮高度对篮球运动员在运动过程中踝关节稳定性及动力学特征的影响。

通过对比分析穿着不同鞋帮高度篮球鞋的篮球运动员在运动时的踝关节角度、踝关节活动幅度、踝关节三维角速度、地面反作用力、踝关节力矩及功率等动力学特征,揭示篮球鞋的鞋帮高度与踝关节受伤风险、运动性能之间的关联,探究篮球鞋的鞋帮高度对运动员踝关节稳定性及动力学的具体影响机

制。以期为篮球运动员提供更加科学合理的选择依据,促进篮球运动的健康发展。

1 材料与方法

1.1 研究对象

根据设定的筛选标准,从上海篮球俱乐部和高校篮球队中,挑选出 18 名符合条件的运动员参与本研究。参与试验的运动员年龄为 20 ~ 26 岁,身高在 179.5 ~ 182.3 cm,体质量为 78.6 ~ 81.2 kg,身体质量指数(body mass index,BMI)为 22 ~ 25 kg/m^2,篮球运动年限为 5 ~ 8 年,所穿鞋码为 42 ~ 44 码(欧码标准)。在试验开始之前,告知所有受试者的试验过程,明确注意事项,确保均能按要求顺利完成试验。

1)纳入标准

①男性运动员,身体健康,无神经肌肉疾病、心肺疾病及严重伤病史;②篮球运动年限在 5 年以上,能够熟练完成试验要求的动作;③在试验开始前 48 h内,未参与过过任何剧烈运动训练;④同意参与本研究,并签署知情同意书。

2)排除标准

①近一年内发生过踝关节损伤史或手术史的运动员;②在实验前一周内有急性伤病或慢性伤病急性发作的运动员;③有扁平足、高弓足或无法按照实验要求完成规定动作的运动员;④存在沟通障碍、理解困难等情况,无法自主配合完成实验。

所有受试者在正式测试前,均已了解试验过程中可能存在的损伤风险,并已知晓和签署知情同意书。本次试验研究已通过伦理委员会的审查(伦理审查编号:SUDA20211227H03)。最后符合试验条件的受试者基本信息统计如表 1 所示。

表 1 受试者的基本信息统计

Tab. 1 Basic information of the subjects

人数	性别	年龄/a	身高/cm	体质量/kg	身体质量指数/(kg · m^{-2})	篮球运动年限/a	鞋码/cm
18	男	23.44 ± 1.15	180.12 ± 3.06	79.86 ± 5.14	23.21 ± 2.53	6.50 ± 0.50	26.5

1.2 试验用鞋

试验选用了安踏的汤普森 3 代(KT3)篮球鞋作为测试用鞋,该运动鞋采用了轻质网布材质加皮革材料,既保证了鞋子的轻盈,又提供了足够的支撑和耐用性(图 1)。鞋中底采用的是 EVA 泡棉和后掌的一大块缓震胶,能有效地吸收和分散冲击力,为运动员提供良好的缓震效果。安踏汤普森 3 代(KT3)低帮篮球鞋脚踝部分露在外面,高度通常在 7 ~ 8 cm 左右(图 1a);高帮篮球鞋的鞋帮将整个脚踝包裹进去,高度大致在 13 ~ 14 cm 左右(图 1b)。高帮和低帮篮球鞋,除了鞋帮高度相差 5 cm(鞋帮高度为鞋口最低点至鞋帮最高点的高度),以及质量相差约 18 g 以外,在材质、面料和技术应用方面均无显著差别。为保证测试条件的一致性,要求受试者穿着统一的篮球袜,并采用传统交差系带的方式系紧鞋带。



图 1 试验用鞋

Fig. 1 Experimental shoes

1.3 测试设备

1)运动捕捉系统[14]:选择英国生产的 Vicon 系统(型号:VK16;公司:Oxford Metrics Limited),采集频率为 200 Hz。通过高速相机捕捉附着在运动员身体上的反光标记点(Marker 点)的位置变化,进而实时计算并输出运动员在三维空间中的运动轨迹、速度、加速度以及关节角度等运动学参数,评估运动员在不同鞋帮高度下的踝关节稳定性。

2)三维测力台[15]:选择瑞士生产的 Kistler 三维测力台(型号:9229A2;公司:KISTLER),采集频率为 1 000 Hz。通过内置的高灵敏度传感器测量运动员在测试过程中施加在测力台上的力的大小和方向,包括垂直方向(垂直地面反作用力)和水平侧向方向(向后地面反作用力、向内地面反作用力)上的峰值力等参数,以评估运动员的踝关节动力学特征以及鞋帮高度对运动员踝关节负荷的影响。

2 试验设计

2.1 试验过程

采用对比试验设计,要求 18 名受试者按照随机

表分别以穿着高帮篮球鞋、穿着低帮篮球鞋、裸足 3 种不同状态参与测试。所有受试者在试验前需进行相同的热身活动,并在试验过程中进行篮球运动中最常见起跳和45°侧切变向动作。试验过程中,使用红外运动捕捉系统、Kistler 测力台系统等设备记录并分析两组受试者的踝关节稳定性和动力学特征。

1)热身运动:在正式测试前,所有受试者需统一进行时长 8 min 的热身运动,包括慢跑、动态拉伸等,以降低运动损伤的风险并提高测试效果。

2)Marker 点粘贴:为受试者粘贴红外运动捕捉系统的反光标志点(Marker 点),以捕捉和记录运动过程中的生物力学数据。确保 Marker 点牢固地粘贴在受试者身上,并要求受试者提前熟悉测试项目和流程,避免对受试者的运动造成干扰。红外运动捕捉系统反光标志点(Marker 点)粘贴情况如表 2 所示。

表 2　红外运动捕捉系统反光标志点粘贴情况

Tab. 2　Adhesion of reflective marker points in the infrared motion capture system

粘贴位置	数量	尺寸/mm	用途
踝关节外侧上方	4	14	捕捉踝关节外侧运动轨迹
踝关节内侧上方	4	14	捕捉踝关节内侧运动轨迹
脚尖	3	10	捕捉脚尖的运动轨迹
脚跟	3	10	捕捉脚跟的运动轨迹
小腿前侧中部	2	12	捕捉小腿前侧的运动轨迹
小腿后侧中部	2	12	捕捉小腿后侧的运动轨迹
大腿外侧	2	14	辅助定义大腿刚体模型
大腿内侧	2	14	辅助定义大腿刚体模型
髂前上棘	1	14	定义骨盆参考点
髂后上棘	1	14	定义骨盆参考点

3)动态测试:在测试人员指导下,所有受试者分别以 3 种不同的穿鞋状态(裸足、低帮鞋、高帮鞋)在测力台上完成跳深测试(drop jump, DJ)和上篮单腿起跳(lay up, LU)两个不同的跳跃动作,以及篮球运动中最常见的45°侧切变向动作,模拟篮球运动中的快速变向。每组动作测试 3 次,每次测试结束休息 3 min,每次换鞋后休息 5 min。这些动作均要求受试者在优势腿蹬踏测力台时开始,至起跳腿离开测力台腾空结束。测试过程中记录并分析地面反作用力、踝关节力矩等动力学特征参数以及受试者的变向速度和稳定性。

2.2　测试指标

试验主要采集受试者穿着不同鞋帮高度篮球鞋在运动时的踝关节稳定性和动力学等相关参数,包括踝关节角度、踝关节活动幅度、踝关节三维角速度、地面反作用力、踝关节力矩及功率等动力学参数等。采用 Visual 3D Version 软件中对本次试验中采集的相关详细数据进行分析。

2.2.1　踝关节稳定性指标

1)踝关节三维峰值角度:在受试者进行特定的运动动作(如跳跃、变向跑等)时,踝关节会经历一定的角度变化。通过运动捕捉系统,精确获取踝关节在三维空间中的最大角度(峰值角度)变化,反映受试者在穿着不同鞋帮高度篮球鞋运动时,其踝关节的活动范围和灵活性。

2)踝关节活动幅度[16]:踝关节的活动幅度表示踝关节在运动中能够经历的角度变化范围。通过计算受试者在多次测试中踝关节角度变化的平均值和标准差,用于了解鞋帮高度如何限制或促进踝关节的活动范围,进而影响受试者的踝关节稳定性。

3)踝关节三维角速度:描述了踝关节在运动中的转动速度,角速度的大小和变化反映了踝关节在快速动作中的反应能力和稳定性。通过运动捕捉系统,测量受试者在特定动作中踝关节的角速度变化,用于评估鞋帮高度对受试者在快速变向或起跳时的稳定性和效率的影响。

2.2.2　踝关节动力学指标

1)地面反作用力[17]:利用 Kistler 三维测力台,实时测量受试者在测试中地面反作用力的大小和方向,评估受试者与地面相互作用效果,明确踝关节在运动中的受力情况。将重点关注垂直方向和水平侧向方向上的峰值力(F_z、F_x)、垂直地面反作用力达到第一峰值力的时间、最大加载量等关键指标。

2)第一峰值力及加载率[18]:是指地面反作用力在垂直方向上达到的第一个最大值,用于评估受试者在起跳或落地等动作中的力量输出;加载率描述了地面反作用力从起始点增加到第一峰值力的速度,较高的加载率意味着受试者在短时间内承受了较大的冲击力。

3)踝关节力矩及功率[19]:力矩是描述力对物体转动效应的物理量,而功率则反映了力在单位时间内所做的功。通过结合运动捕捉系统和测力台的数据,计算出受试者在运动中踝关节的力矩和功率,从

而反映受试者踝关节在运动中的动力输出和能量消耗情况，进而评估鞋帮高度对运动员动力学特征的影响。

2.3　统计学分析

所有计数资料采用平均值 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示，并用 SPSS 24.0 软件进行统计分析，采用单因素方差分析(ANOVA)比较穿着不同鞋帮高度篮球鞋运动时受试者的踝关节稳定性及动力学参数的差异，独立样本和配对样本的显著性均行 T 检验。$P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

3　研究结果

3.1　不同篮球鞋鞋帮高度对踝关节稳定性的影响

3.1.1　踝关节三维峰值角度及活动度

不同篮球鞋鞋帮高度对受试者踝关节三维峰值角度及活动度的影响如表 3 所示。受试者在裸足状态下由于没有鞋帮的约束，踝关节的自由度较高。

表 3　踝关节角度及活动度变化

Tab.3　Changes in ankle joint angle and range of motion

测试指标		裸足	低帮篮球鞋	高帮篮球鞋
矢状面	最大背屈/(°)	14.43 ±3.44	8.57 ±2.45 *	8.32 ±2.06 *
	最大跖屈/(°)	17.45 ±3.21	18.62 ±4.15	18.27 ±4.02
	跖背屈活动幅度/(°)	29.13 ±5.42	26.22 ±5.07 *	23.48 ±5.35 **
冠状面	最大内翻/(°)	3.69 ±3.88	3.96 ±4.06	4.53 ±4.38 *
	最大外翻/(°)	3.34 ±2.27	3.55 ±2.82	3.14 ±2.06
	内外翻活动幅度/(°)	6.44 ±3.23	6.62 ±3.15	8.86 ±3.25 **
水平面	最大内旋/(°)	6.37 ±1.26	6.86 ±1.28	9.33 ±1.06 **
	最大外旋/(°)	4.32 ±2.61	2.58 ±1.74 *	2.39 ±1.58 *
	内外旋活动幅度/(°)	10.78 ±3.12	10.14 ±3.17	10.56 ±3.08

注：* 表示与裸足间有显著性差异；** 表示高帮鞋与低帮鞋间有显著性差异。

其中，裸足状态下踝关节的最大背屈、最大外旋角度及跖背屈活动幅度均大于穿着低帮鞋和穿着高帮鞋，具有显著性差异($P<0.05$)；穿着低帮鞋的最大背屈、最大跖屈、最大外翻、最大外旋角度均略高于穿着高帮鞋，但差异无统计学意义($P>0.05$)；穿着高帮鞋的最大内翻角度高于穿着低帮鞋，差异显著($P<0.05$)；对于踝关节三维活动度而言，穿着高帮鞋的跖背屈活动幅度、内外翻活动幅度显著高于穿着低帮鞋，差异显著($P<0.05$)；受试者穿着低帮鞋较裸足状态、穿着高帮鞋的内外旋活动幅度更低，但差异无统计学意义($P>0.05$)。

3.1.2　踝关节三维角速度

受试者穿着不鞋帮高度篮球鞋做运动时的踝关节三维角度变化如表 4 所示。

表 4　踝关节三维峰值角速度变化(单位:°/s)

Tab.4　Changes in three-dimensional peak angular velocity of ankle joint (unit:°/s)

测试指标		裸足	低帮篮球鞋	高帮篮球鞋
矢状面	最大背屈	485.63 ±58.72	485.56 ±64.26	479.71 ±56.74
	最大跖屈	668.76 ±98.12	621.25 ±101.27 *	559.45 ±78.98 **
冠状面	最大内翻	256.32 ±88.76	254.84 ±90.11	214.52 ±84.32 **
	最大外翻	568.48 ±98.25	516.76 ±80.26 *	453.66 ±83.42 **
水平面	最大内旋	252.64 ±47.35	242.68 ±57.63 *	208.78 ±49.67 **
	最大外旋	264.52 ±34.68	229.35 ±41.23 *	227.45 ±37.25 *

注：* 表示与裸足间有显著性差异；** 表示高帮鞋与低帮鞋间有显著性差异。

裸足状态下，脚踝的活动完全自由，没有鞋帮的限制。因此，在进行各种动作时，脚踝的各项峰值角速度较穿鞋状态(高帮、低帮)会达到最高。穿着低帮鞋较裸足状态的最大背屈角速度无显著性差异

($P>0.05$),较穿着高帮鞋的最大背屈角速度略微更高,但差异并不明显($P>0.05$);穿着高帮鞋的最大跖屈角速度比低帮鞋降低了约 61.8 °/s,具有显著差异($P<0.05$);穿着低帮鞋的最大内翻、最大外翻角速度较裸足状态均无显著差异($P>0.05$),但较穿着高帮鞋更高,具有显著性差异($P<0.05$);裸足状态的最大内旋、最大外旋角速度均显著大于穿着高帮鞋和穿着低帮鞋($P<0.05$),且穿着高帮鞋的最大内旋角速度较穿着低帮鞋降低了 33.9°/s,具有显著性差异($P<0.05$),而穿着高帮鞋和穿着低帮鞋运动时的最大外旋角速度之间无统计学差异($P>0.05$)。

3.2 不同篮球鞋鞋帮高度对踝关节动力学特征的影响

3.2.1 地面反作用力指标变化

受试者在穿不同鞋帮高度篮球鞋做 45°侧切运动时的地面反作用力变化情况如表 5 所示。

表 5　45°侧切运动时地面反作用力变化

Tab. 5　Changes in ground reaction force during 45 ° lateral cutting motion

测试指标	向后地面反作用力峰值/($N \cdot BW^{-1}$)	向内地面反作用力峰值/($N \cdot BW^{-1}$)	最大垂直地面反作用力/N
裸足	-0.68 ± 0.23	1.08 ± 1.14	2.34 ± 0.63
低帮篮球鞋	$-0.76 \pm 0.11^{*}$	1.13 ± 1.04	$3.78 \pm 0.82^{*}$
高帮篮球鞋	$-0.81 \pm 0.18^{*}$	$1.57 \pm 1.16^{**}$	$6.42 \pm 0.67^{**}$

注:* 表示与裸足间有显著性差异;** 表示高帮鞋与低帮鞋间有显著性差异。

穿着高帮鞋时的向后地面反作用力峰值较裸足状态和穿着低帮鞋时更高,但不具备显著性差异($P>0.05$)。穿着高帮鞋时的向内地面反作用力峰值较穿着低帮鞋时略高 0.44 $N \cdot BW^{-1}$,具有显著性差异($P<0.05$);穿着低帮鞋时的向内地面反作用力峰值较裸足状态时略高 0.05 $N \cdot BW^{-1}$,无统计学意义($P>0.05$)。穿着高帮鞋时的最大垂直地面反作用力较穿着低帮鞋增大了 2.64 N,具有显著性差异($P<0.05$),说明穿着高帮鞋进行侧切,使踝关节内侧受到的冲击力增大。

3.2.2 第一峰值力及加载率指标变化

受试者在穿不同鞋帮高度篮球鞋做侧切运动时的垂直作用力的第一峰值力和最大加载率的变化情况如表 6 所示。

受试者穿着高帮篮球鞋运动时产生的垂直作用力第一峰值力较穿着低帮鞋更高,具有显著性差异($P<0.05$);裸足状态和穿着低帮篮球鞋时第一峰值力出现的时间并无显著性差异($P>0.05$);而穿着高帮篮球鞋时第一峰值力出现的时间最长,与裸足状态和穿着低帮鞋时均具有极显著性差异($P<0.01$);第一峰值力的最大加载率在不同鞋帮高度篮球鞋之间具有显著性差异($P<0.05$),且穿着高帮篮球鞋时最低,较穿着低帮篮球鞋时具有极显著性差异($P<0.01$)。

表 6　第一峰值力及加载率指标变化

Tab. 6　Changes in the first peak force and loading rate indicators

测试指标	第一峰值力/($N \cdot kg^{-1}$)	第一峰值力出现时间/ms	最大加载率/($N \cdot s^{-1}$)
裸足	1.54 ± 0.42	21.33 ± 3.62	98.83 ± 13.07
低帮篮球鞋	$1.82 \pm 0.33^{*}$	21.68 ± 3.02	$88.56 \pm 10.43^{*}$
高帮篮球鞋	$2.21 \pm 0.51^{**}$	$35.18 \pm 5.11^{**}$	$64.42 \pm 11.56^{**}$

注:* 表示与裸足间有显著性差异;** 表示高帮鞋与低帮鞋间有显著性差异。

3.2.3 踝关节力矩及功率变化

穿着不同鞋帮高度篮球鞋运动时受试者的踝关节力矩及功率变化如表 7 所示。

受试者在穿着高帮鞋运动时,着地时刻和离地时刻的踝关节力矩均较穿着低帮鞋时更低,具有显著性差异($P<0.05$);穿着低帮鞋运动时着地时刻的最大伸踝力矩较穿着高帮鞋时增大 0.44 N·m/kg,具有显著性差异($P<0.05$);穿着高帮篮球鞋较穿着低帮鞋时的最大踝向心功率减小 1.12 W/kg,穿着高帮篮球鞋较穿着低帮鞋时的最大踝离心功率增大 2.34 W/kg,均具有显著性差异($P<0.05$)。

表 7 踝关节力矩及功率变化

Tab. 7 Changes in ankle joint torque and power

测试指标	着地时刻踝关节力矩/(N·m·kg^{-1})	最大伸踝力矩/(N·m·kg^{-1})	离地时刻踝关节力矩/(N·m·kg^{-1})	最大踝向心功率/(W·kg^{-1})	最大踝离心功率/(W·kg^{-1})
裸足	−1.27 ±1.14	5.13 ±0.42	1.16 ±0.01	28.38 ±4.25	−45.38 ±8.65
低帮篮球鞋	−1.43 ±0.42	5.75 ±0.57*	1.37 ±0.04*	29.16 ±5.11	−47.46 ±9.05
高帮篮球鞋	−1.68 ±0.85**	5.31 ±0.71**	1.21 ±0.04**	28.04 ±5.23	−45.12 ±8.66

注：* 表示与裸足间有显著性差异；** 表示高帮鞋与低帮鞋间有显著性差异。

4 分析与讨论

4.1 踝关节稳定性变化的分析与讨论

运动员裸足状态下，由于没有鞋帮的限制，脚踝的活动自由度最高，能够展现出更大的活动范围和速度[20]。在最大背屈、最大跖屈、最大外翻、最大外旋角度方面，穿着低帮鞋略高于穿着高帮鞋，但差异并不显著($P>0.05$)，意味着在这几个方向上，低帮鞋和高帮鞋对踝关节的限制作用相似，差异不大。然而，高帮鞋在最大内翻角度上显著高于低帮鞋，这是由于高帮鞋的设计在防止内翻方面提供了额外的支持。在踝关节三维活动度方面，受试者穿着高帮鞋的跖背屈活动幅度和内外翻活动幅度显著高于穿着低帮鞋($P<0.05$)。这表示高帮鞋更适合需要更大范围内外翻活动的篮球运动员，尤其是在需要快速变向和跳跃的比赛中，这也进一步证实了高帮鞋在提供踝关节稳定性方面的优势，尤其是在防止内外翻方面。受试者穿着低帮鞋在内外旋活动幅度上较裸足状态和穿着高帮鞋更低，但差异并不显著($P>0.05$)。这是由于低帮鞋的设计主要关注于提供稳定的支持和保护，而不太影响内外旋的活动。鞋帮的高度对踝关节的活动度有显著影响，运动员穿着低帮鞋虽然对踝关节的限制较少，但在提供内翻稳定性和内外翻活动幅度方面不如高帮鞋，高帮篮球鞋更有助于降低运动员在篮球运动中受伤的风险。

低帮篮球鞋通常设计较为轻便，对脚踝活动的限制较少，运动员在快速移动和跳跃时，脚踝能够较为自由地达到其最大跖屈角速度。但由于低帮鞋无法提供与高帮鞋同等的支撑，运动员在进行变向、急停等动作时，脚踝可能会经历更大的内翻或外翻动作，因此踝最大内翻/外翻的峰值角速度会相对较高。而低帮鞋对踝最大背屈的峰值角速度影响不大，因为背屈动作通常发生在跳跃、着地等动作中，更多地与鞋底的设计(如抗扭转部件)相关[21]。高帮篮球鞋的鞋帮较高，能够覆盖运动员脚踝的大部分区域，为脚踝提供额外的支撑和和稳定性，有助于减少运动员在快速移动和变向时脚踝扭伤的风险。受试者穿着高帮鞋时，最大跖屈角速度和最大内旋角速度的显著降低，正是高帮鞋提供稳定性的一种体现，表明高帮鞋能够限制脚踝在特定方向上的过度运动，从而保护脚踝免受损伤。受试者穿着低帮鞋的最大内翻和最大外翻角速度上与裸足状态无显著差异($P>0.05$)，但相对于穿着高帮鞋，这些角速度更高且具有显著性差异($P<0.05$)。这表示低帮鞋对脚踝内外翻动作的限制较少，使得运动员在进行这些动作时更加灵活。

4.2 踝关节动力学特征变化的分析与讨论

向后地面反作用力是运动员在运动中与地面相互作用时产生的力，它反映了运动员在推动自己或减速时与地面的相互作用[22]。尽管较高的篮球鞋鞋帮能够覆盖住脚踝的大部分区域，为篮球运动员的脚踝提供更强的支撑和稳定性，从而提高运动员在侧切等快速变向动作中的稳定性。但所增加的稳定性更多影响的是运动员踝关节的侧向运动，而对向后地面反作用力的影响较小，因此不同鞋帮高度下运动员运动时踝关节的向后地面反作用力无显著差异($P>0.05$)。同时，由于鞋帮对脚踝的限制，高帮篮球鞋会使得运动员在侧切时更多地依赖踝关节的刚性来支撑身体，从而增加了向内地面反作用力的峰值[23]。然而，穿着低帮鞋时对脚踝的限制较少，运动员的脚踝能够更自由地活动，这有助于运动员在侧切时更流畅地转移身体重心，减少了对踝关节的刚性依赖，因此向内地面反作用力峰值较高帮鞋时更小，且与裸足状态相近($P>0.05$)。受试者穿着高帮篮球鞋进行侧切运动时，其最大垂直地面反作用力较穿着低帮鞋时显著增大($P<0.05$)。

这一结果表明,高帮篮球鞋的鞋帮结构会影响足部的整体力学行为,特别是在垂直方向上的冲击吸收和传递。所增加的垂直反作用力意味着高帮篮球鞋在提供额外支撑的同时,也可能增加了踝关节在垂直方向上的负荷,这会对长时间或高强度篮球运动中的运动员,产生增加关节和软组织的压力等不同的影响。

随着篮球鞋鞋帮高度的不断增加,受试者在运动时垂直地面作用力第一峰值力逐渐增大,且具有显著性差异($P<0.05$)。这表明高帮鞋在运动员进行侧切动作时,通过其结构特性(如更高的鞋帮、更紧的包裹性等)增加了足部的稳定性和支撑,从而在运动初期产生了更大的垂直冲击力。这种增加的第一峰值力是高帮鞋为预防踝关节损伤而提供的一种"预加载"效应,旨在通过增加初始冲击力来增强足部和踝关节的稳定性。受试者穿着高帮篮球鞋时,第一峰值力出现的时间也较裸足和穿着低帮鞋状态最长($P<0.01$),是因为高帮篮球鞋能够包裹住运动员的脚踝部分,进而影响足部与地面的接触过程,使得冲击力的传递和分布更加平缓。较长的第一峰值力出现时间则意味着高帮鞋在减少冲击力突然增加的风险方面具有一定的作用,有助于降低踝关节因突然受力而受伤的风险。且受试者穿着高帮篮球鞋时的加载率最低,与穿着低帮鞋相比具有极显著差异($P<0.01$)。最大加载率是评估冲击力传递速度的重要指标,较低的加载率意味着冲击力在传递过程中更加平缓,减少了因冲击力突然增加而对踝关节造成的潜在损伤风险。这一结果进一步支持了高帮篮球鞋在保护运动员踝关节方面的有效性,通过减缓冲击力的传递速度来降低损伤风险。

穿着高帮篮球鞋在着地阶段的踝关节力矩较低帮鞋更小($P<0.05$),这表明高帮篮球鞋在着地阶段为踝关节提供了更强的外部支撑,减少了踝关节内部肌肉和韧带产生的力矩需求。这种外部支撑往往会通过限制踝关节的过度运动来稳定关节,从而有效减少踝关节在承受冲击时所需的内部力矩。同时,低帮鞋虽然也提供了一定支撑,但保护性不及高帮鞋,运动员需要更多地依赖踝关节的肌肉力量来产生伸踝力矩,以应对运动中的冲击和维持稳定性。而高帮鞋则可以通过其结构特性帮助分担部分力矩需求,减轻踝关节的负担,因此在着地阶段产生较小的最大伸踝力矩。而在运动员起跳离地阶段,脚踝需要产生较大的背屈力矩,以推动身体向上和向前运动,提高起跳的效率和高度。在裸足状态下,离地时刻的踝关节力矩完全依赖于脚踝的自然力量和稳定性,这会导致力矩的生成不如穿鞋时有效。而穿高帮鞋的踝关节力矩较低帮鞋更低,意味着在起跳过程中,高帮鞋需要提供更多的支持和稳定性,但也限制了一定的自然运动范围,从而影响了运动员踝关节产生力矩的能力。

向心功率通常与肌肉收缩产生力量以克服阻力或加速运动有关,受试者最大踝向心功率随着鞋帮高度的增加而减小($P<0.05$)。这一变化表明,高帮篮球鞋在运动员进行爆发性动作(如起跳或快速推进)时,由于部分力量被鞋帮结构所吸收或分散,踝关节在需要产生向心力量时(如推离地面)的效率也有所降低。而离心功率与肌肉在收缩过程中控制运动并减缓运动速度的能力有关,受试者最大踝离心功率则随着鞋帮高度的增加而增大($P<0.05$)。表明在高帮鞋的保护下,踝关节在承受离心负荷(如着地冲击)时具有更高的功率输出能力。这是由于高帮鞋提供的额外支撑和稳定性使得踝关节能够更好地吸收和分散冲击能量,从而允许肌肉以更高的效率进行离心收缩,有助于运动员在着地时更好地稳定身体,减少因冲击造成的损伤。

5 结 论

通过对比分析篮球鞋不同的鞋帮高度对运动员踝关节稳定性及动力学特征的影响发现,高帮鞋和低帮鞋在功能和效果上存在显著差异。高帮鞋通常提供更强的踝关节支持和稳定性。其设计能够包裹住踝关节,为运动员在进行快速移动、侧切、急停等高强度动作时提供额外的支撑,这种支撑有助于减少踝关节的异常扭动和损伤。为此,高帮篮球鞋的设计更适合需要频繁奔跑和急转的力量型篮球运动员,多为内线球员提供,有助于减轻运动员在背身要位,拼抢篮板及起跳时给脚踝所带来的压力。从动力学特征上看,高帮鞋会在一定程度上限制踝关节的灵活性,从而影响到运动员的某些爆发性动作,如快速起跳等。然而,这种限制也带来了更低的踝关节应力,有助于预防运动损伤。相比之下,低帮鞋则提供了更高的灵活性和自由度,对踝关节的束缚较少,使得运动员能够更自然地移动,并在需要时充分发挥踝关节的力量和速度。这种设计特别适合于那些需要高度灵活性和快速反应的速度型篮球运动

员,多为后卫提供,有助于变向。然而,低帮鞋可能在提供足够稳定性方面存在挑战,尤其是在高强度和高冲击性的运动环境中,这可能会增加踝关节受伤的风险。

综上所述,高帮鞋和低帮鞋各有其优势和局限性。高帮鞋更适合那些需要高强度支持和稳定性的运动员,而低帮鞋则更适合追求灵活性和自由度的运动员。在选择时,运动员应根据自己的技术特点、运动需求和健康状况来做出最合适的决定。同时,鞋子的材料、设计和制造工艺也是影响其性能和舒适度的重要因素,值得进一步考虑。

参考文献:

[1] 滕进,申思琴,曲峰. 篮球鞋中底厚度对冲刺和侧滑的影响[J]. 北京体育大学学报,2023,46(8):123-132.
TENG Jin,SHEN Siqin,QU Feng. Study on the effect of midsole thickness of basketball shoes on sprint and shuffle[J]. Journal of Beijing Sport University,2023,46(8):123-132(in Chinese).

[2] JIANG C. The effect of basketball shoe collar on ankle stability:a systematic review and meta-analysis[J]. Physical activity and health,2020,4(1):11-18.

[3] TAYLOR J B,FORD K R,NGUYEN A D,et al. Prevention of lower extremity injuries in basketball:a systematic review and meta-analysis[J]. Sports health,2015,7(5):392-398.

[4] WANG L Y,YE J H,ZHANG X Y. Ankle biomechanics of the three-step layup in a basketball player with chronic ankle instability[J]. Scientific reports,2023,13(1):18667.

[5] 戴伟勋,于海滨,林建志,等. 篮球运动典型跳跃动作助跑单脚跳的下肢力学研究[J]. 天津体育学院学报,2021,36(2):198-202.
DAI Weixun,YU Haibin,LIN Jianzhi,et al. Biomechanics analysis of lower extremities during running single leg jump of basketball players[J]. Journal of Tianjin University of Sport,2021,36(2):198-202(in Chinese).

[6] LAM W K,KAN W H,CHIA J S,et al. Effect of shoe modifications on biomechanical changes in basketball:a systematic review[J]. Sports biomechanics,2022,21(5):577-603.

[7] PADUA E,D'AMICO A G,ALASHRAM A,et al. Effectiveness of Warm-Up routine on the ankle injuries prevention in young female basketball players:a randomized controlled trial[J]. Medicina,2019,55(10):690.

[8] 傅维杰,何俊良,王熙,等. 鞋帮高度对跳跃动作踝关节矢状面运动学及动力学特征的影响[J]. 医用生物力学,2015,30(6):528-534.
FU Weijie,HE Junliang,WANG Xi,et al. Effects of shoe collar height on kinematics and kinetics of ankle joint in sagittal plane under different jumping maneuvers[J]. Journal of medical biomechanics,2015,30(6):528-534(in Chinese).

[9] 魏书涛. 不同鞋帮类型足球鞋对踝关节稳定性的影响[J]. 皮革科学与工程,2021,31(1):69-74.
WEI Shutao. Football shoe collar types effect on ankle stability[J]. Leather science and engineering,2021,31(1):69-74(in Chinese).

[10] 周志鹏,郑亮亮,孙萌梓,等. 鞋帮高度对侧切动作踝关节生物力学特征的影响[J]. 皮革科学与工程,2021,31(6):64-69.
ZHOU Zhipeng,ZHENG Liangliang,SUN Mengzi,et al. Effects of shoe collar height on ankle joint kinematics and kinetics during side-cutting task[J]. Leather science and engineering,2021,31(6):64-69(in Chinese).

[11] 鲍春雨,孟庆华,颜明明. 篮球运动员急停起跳动作踝关节生物力学特征分析[J]. 应用力学学报,2019,36(2):492-498.
BAO Chunyu,MENG Qinghua,YAN Mingming. Analysis of biomechanical characteristics of ankle during stop-jump for basketball player[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(2):492-498(in Chinese).

[12] HADZOVIC M,ILIC P,LILIC A,et al. The effects of a knee joint injury prevention program on young female basketball players:a systematic review[J]. Journal of anthropology of sport and physical education,2020,4(1):51-56.

[13] 邓超. 篮球鞋结构对运动损伤的生物力学影响综述[J]. 中国皮革,2023,52(3):76-79.
DENG Chao. Biomechanical effects of basketball shoes structure on sports injury[J]. China leather,2023,52(3):76-79(in Chinese).

[14] 王俊清,张希妮,罗震,等. 步频再训练对跑步时下肢冲击的生物力学影响研究[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2167-2175.
WANG Junqing,ZHANG Xini,LUO Zhen,et al. The influence of cadence retraining on impact forces and lower extremity biomechanics during running[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(5):2167-2175(in Chinese).

[15] 杨洋,张希妮,罗震,等. 跑姿再训练对冲击力、下肢生物力学及刚度的影响[J]. 医用生物力学,2020,35(6):665-671.
YANG Yang,ZHANG Xini,LUO Zhen,et al. Effects of gait retraining on impact forces,lower limb biomechanics and leg stiffness[J]. Journal of medical biomechanics,2020,35(6):665-671(in Chinese).

[16] 明安华,何辉,杨帆,等. 跑速对男性大学生下肢关节负荷特征的影响[J]. 应用力学学报,2022,39(2):224-230.
MING Anhua,HE Hui,YANG Fan,et al. Effect of running speed on lower extremity joint load in male college students[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(2):224-230(in Chinese).

[17] 魏震,王琳. 基于统计参数映射分析不同习惯落地模式跑者跑

步过程中地面反力的差异[J]. 应用力学学报,2023,40(2):474-480.

WEI Zhen, WANG Lin. Ground reaction forces characteristics among runners with different foot strike patterns:Analysis of one-dimensional statistical parametric mapping[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(2):474-480(in Chinese).

[18] 赵文悦,孟庆华,鲍春雨. 羽毛球运动员踝关节生物力学特征对机械不稳的影响研究[J]. 应用力学学报,2022,39(2):241-246.

ZHAO Wenyue, MENG Qinghua, BAO Chunyu. The influence of biomechanical characteristics of foot-ankle coupling system on mechanical instability of badminton players[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(2):241-246(in Chinese).

[19] 胡国炯,刘青,卢顺秀,等. 膝关节屈伸对踝关节矢状面峰力矩及其力矩比的影响[J]. 医用生物力学,2021,36(增刊 1):129.

HU Guojiong, LIU Qing, LU Shunxiu, et al. The effect of knee flexion and extension on the sagittal peak torque and torque ratio of the ankle joint[J]. Journal of medical biomechanics,2021,36(S1):129(in Chinese).

[20] 叶东强,孙晓乐,肖松林,等. 基于高速荧光透视成像探究裸足与着鞋对跑步时距上和距下关节在体运动学的影响[J]. 体育科学,2022,42(1):59-67.

YE Dongqiang, SUN Xiaole, XIAO Songlin, et al. Effects of barefoot and shod on in vivo kinematics of the tibiotalar and subtalar joint during running based on the high-speed dual fluoroscopic imaging system[J]. China sport science,2022,42(1):59-67(in Chinese).

[21] 郑义,曲毅,屈莎. 不同鞋底硬度对跑步时下肢生物力学特征的影响[J]. 科学技术与工程,2016,16(36):139-146.

ZHENG Yi, QU Yi, QU Sha. Effect of different Sole hardness on the biomechanics of lower limb in running[J]. Science technology and engineering,2016,16(36):139-146(in Chinese).

[22] RICHARDS D P, AJEMIAN S V, WILEY J P, et al. Relation between ankle joint dynamics and patellar tendinopathy in elite volleyball players[J]. Clinical journal of sport medicine,2002,12(5):266-272.

[23] 李利. 篮球运动鞋鞋帮高度对足踝运动学的影响研究[J]. 中国皮革,2024,53(4):86-89.

LI Li. Influence of upper height of basketball sport shoes on ankle kinematics[J]. China leather,2024,53(4):86-89(in Chinese).

（编辑　张璐）